

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 31420121150066

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料的制备及其与成骨细胞相互作用的研究

The preparation of PPy/PDA nanocomposites material  
and its interaction with osteoblasts

戴玲凤

指导教师姓名: 葛东涛 教授

专 业 名 称: 生物医学工程

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2015 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘要

近年来, 导电高分子纳米材料已经成为材料制备领域的研究热点之一。聚吡咯 (PPy) 作为导电高分子家族的重要成员, 是目前研究最多并且最具有应用价值的导电高分子之一。相比于其它导电高分子, 聚吡咯纳米材料不仅具有优异的稳定性、导电性以及抗腐蚀性, 还具有良好的生物相容性, 因此广泛应用于金属种植体涂层、药物释放载体、组织工程支架材料等生物医学领域的研究。随着人们对生物医学材料性能需求的不断提高, 深入探索功能性更强、应用性更广的聚吡咯纳米复合材料已经成为聚吡咯研究的新趋势。

自从科学家发现仿贻贝粘连蛋白的多巴胺分子在碱性有氧水环境下能够自聚合, 多巴胺已经成为表面修饰领域的研究热点。多巴胺可在包括金属、金属氧化物、高聚物甚至超疏水表面等多种材料表面沉积成膜, 且该过程不受三维结构限制, 显示出极为巨大的潜在应用。虽然聚多巴胺形成机理还不甚清楚, 但由于其可以进一步与氨基或巯基发生加成反应, 由此可以实现膜表面生物活性分子(多糖、生长因子、蛋白质等)的固定, 因而被广泛应用于生物材料表面修饰领域。由于高分子纳米材料表面易于修饰, 因此, 我们设想通过多巴胺实现对聚吡咯纳米材料表面进行复合改性, 构造出一种新型的聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料。纳米形貌的聚吡咯有良好的生物相容性, 但其生物活性较低, 而聚多巴胺不仅具有生物相容性还有生物活性, 此外, 目前对聚多巴胺的研究主要针对其普通形貌, 纳米形貌的聚多巴胺可能具有更好的生物功能。因此聚吡咯与聚多巴胺的复合作用将是相互的, 聚多巴胺的修饰影响聚吡咯表面的生物活性, 而聚吡咯的形貌特征同时影响着聚多巴胺的性能, 这为该复合材料的物理化学性能及其在生物医学领域的应用带来了研究价值。

随着社会的发展, 因骨缺损造成的骨移植材料的需求急剧增加, 良好的骨移植材料不仅需要具有良好的生物相容性, 还要具有骨诱导活性, 因此寻找和探索有效的新型骨移植材料具有非常重要的意义。聚吡咯用于骨移植材料的探索已有报道, 然而其实际应用受生物活性的限制。成骨细胞(MC3T3-E1)是成骨过程非常重要的细胞, 植入材料的生物相容性及生物活性直接影响成骨细胞的生物学特征, 是植入手术成败的关键。由于聚吡咯纳米线能够促进细胞的粘附与增值, 而

聚多巴胺不仅能够提高材料的生物相容性，还有助于引导材料表面的矿化，可以预见聚吡咯纳米材料与聚多巴胺的有机结合将对成骨细胞生物学特征产生积极的影响。

因此，本文主要研究内容如下：（1）改变电化学聚合方式及聚合时间，制备不同形貌及尺寸的聚吡咯纳米线，并对其各项物理化学性能进行分析表征；（2）通过溶液氧化法，在不同的沉积时间下，在聚吡咯纳米线表面获得聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料，并进行各项物理化学性能的分析表征；（3）探究成骨细胞在聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料表面的粘附、增殖及生物学合成情况。

主要研究结果如下：（1）采用恒电压聚合法，在聚合时间为 200s 时，能够得到形貌均匀统一的，长径比较高的聚吡咯纳米线。在溶液中氧化聚合 5 h 时，获得的复合材料具有均匀的纳米线形貌。（2）材料分析结果显示，单一聚吡咯纳米线表面光滑，直径在 40-60 nm，长度为微米级，长径比较高。聚多巴胺为排列紧凑的粒子，膜厚度约为 20 nm。聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料纳米线直径约为 80-100 nm，表面较为粗糙，保持较高的长径比。电化学活性测试结果表明复合材料具有显著的氧化还原活性，稳定性较高，而且具有防腐性能。经聚多巴胺修饰之后，亲水性明显提高，且仍然具有一定的导电性，这一性能拓展了复合材料在电刺激响应性材料方面的应用；（3）MTT 法表明，该复合材料有助于细胞的粘附与增值。荧光染色及扫描电子显微镜进一步证明了聚吡咯纳米线经聚多巴胺修饰之后，有助于细胞在其上面的粘附及铺展。BCA 蛋白检测试剂盒结果显示，复合材料上的成骨细胞蛋白合成量最多，即细胞新陈代谢活性最高。ALP 碱性磷酸酶活性测试表明，聚吡咯/聚多巴胺组的酶活性明显高于单一的聚吡咯纳米线组及普通形貌聚多巴胺组，进一步证明纳米形貌的聚吡咯经聚多巴胺表面改性后，能够促使成骨细胞提前进入成熟期，进行矿化成骨。

**关键词：**聚吡咯纳米线；聚多巴胺；聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料；成骨细胞

## Abstract

In recent years, conductive polymer nanomaterials have become one of the focus areas in material preparation. As an important member of conductive polymer family, polypyrrole (PPy) has been broadly studied, and show broader application value. Compared to other conductive polymers, PPy nanomaterials have not only excellent stability, electrical conductivity and corrosion resistance, but also good biocompatibility, so they are widely used in metal implant coatings, drug delivery carriers, tissue engineering scaffold materials and other areas of biomedical research. As the demand for enhancing the performance of biomedical materials, exploring stronger function and wider application PPy nanocomposites has become a new trend in the research of PPy.

Since scientists have discovered that dopamine(DA) molecule can imitate mussel adhesive proteins to self-aggregate in alkaline water aerobic environment, DA has become a hot topic in the field of surface modification. DA can be deposited on various materials' surface including metals, metal oxides, polymers, even super-hydrophobic materials without limited by the three-dimensional structure, which shows a very great potential application value. Although polydopamine(PDA) formation mechanism is still unclear, it has been widely used in biomaterials surface modification for possible further addition reactions with amino or mercapto groups, moreover the film surface could be fixed by biologically active molecules (polysaccharides, growth factors, proteins and the like). Because the surface of polymer nanomaterials is easy to be modified, we envisage to modify the surface of PPy nanomaterials by DA to obtain a new type of PPy/ PDA nanocomposites material. PPy nanomaterials have good biocompatibility, but low biological activity, PDA both has bioactivity and biocompatibility, in addition, current research main focused on PDA's general morphology, its nanotopography may have better biological function. Therefore, the interaction between PPy and PDA will be mutual, modification of PDA affect the biological activity of PPy, morphology of PPy affect the performance of

PDA, which bring the research value in the composites' properties and applications.

With the development of society, the demand for bone graft materials increase sharply due to bone defects. Good bone graft materials not only have good biocompatibility, but also bone-inducing activity, therefore finding and exploring effective new bone graft materials has a very important significance. PPy for bone graft material exploration has been reported, however, its practical application was limited by the biological activity. Osteoblasts(MC3T3-E1) play an important role for bone formation, the biocompatibility and bioactivity of implant materials directly impact its biological characteristics, so the interaction between MC3T3-E1 and materials is the key to implant surgery. Because PPy nanowires can promote cell adhesion and proliferation, and PDA can improve biocompatibility and mineralization ability on material surface, it can be foreseen that the combination of PPy nanomaterials with PDA will have a positive impact on biological characteristics of bone cells.

Therefore, main contents of this article are as follows: (1) changing the way of electrochemical polymerization and polymerization time, to prepare various shapes and sizes of PPy nanowires and analyze their various physical and chemical properties; (2) using solution oxidation method to get PPy/PDA nanocomposites on the surface of PPy nanowires obtained in the above under different deposition time, characterizing their physical and chemical properties; (3) exploring MC3T3-E1 cells' adhesion, proliferation and synthesis of biology on the surface of PPy/PDA nanocomposites.

The main findings are as follows: (1) using constant voltage polymerization method and 200s polymerization time, uniform morphology and high aspect ratio of PPy nanowires membrane is achieved. polymerized in alkaline water aerobic solution 5 h, the nanocomposites material with uniform nanowires morphology is obtained. (2) The analysis and characterization show PPy nanowires have a smooth surface, the diameter is between 40-60 nm, length is in micro level and the aspect ratio is high. PDA particles are pack tightly, the thickness of film is about 20 nm. PPy/PDA nanocomposites diameter is about 80-100 nm, the surface is rough but maintain a high aspect ratio. Electrochemical activity tests show the composite material have a

significant redox activity, high stability and anti-corrosion properties. After PPy nanowires is modified by PDA, the hydrophily is significantly improved, and still have electrical conductivity, this will expand the material's application in response to electrical stimulation.(3) MTT method shows that the composite material could help cell adhesion and appreciation. Staining and scanning electron microscope further evidence PDA can support cell adhesion and spreading on the PPy surface. BCA protein assay shows MC3T3-E1 cultured on the composite material have the highest amount of protein synthesis, i.e. highest metabolism activity. ALP alkaline phosphatase activity test shows that the activity in PPy/PDA group is significantly higher than other groups, which means PPy nanowires can induce MC3T3-E1 step into mature stage earlier and osteogenic mineralization after PDA modified.

**Key word:** PPy nanowires; PDA; PPy/PDA nanocomposites material; MC3T3-E1



# 目录

## 第一章 绪论..... 错误！未定义书签。

- 1.1 导电高分子纳米复合材料..... 错误！未定义书签。
  - 1.1.1 导电高分子纳米复合材料的制备方法..... 错误！未定义书签。
  - 1.1.2 导电高分子聚吡咯纳米复合材料的种类及应用..... 错误！未定义书签。
- 1.2 多巴胺..... 错误！未定义书签。
  - 1.2.1 多巴胺的聚合机理..... 错误！未定义书签。
  - 1.2.2 多巴胺的聚合方法..... 错误！未定义书签。
  - 1.2.3 多巴胺的应用..... 错误！未定义书签。
- 1.3 课题的提出与基本研究思路..... 错误！未定义书签。
- 参考文献..... 错误！未定义书签。

## 第二章 聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料的制备及其理化性质的表征..... 错误！未定义书签。

- 引言..... 错误！未定义书签。
- 2.1 实验方法..... 错误！未定义书签。
  - 2.1.1 试剂和仪器..... 错误！未定义书签。
  - 2.1.2 基底材料制备..... 错误！未定义书签。
  - 2.1.3 溶液的配制..... 错误！未定义书签。
  - 2.1.4 聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料的制备..... 错误！未定义书签。
  - 2.1.5 聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料的理化性质表征..... 错误！未定义书签。
- 2.2 实验结果与讨论..... 29
  - 2.2.1 电化学合成曲线..... 29
  - 2.2.2 形貌表征..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.3 结构组成表征..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.4 电化学沉积方式对 PPy 形貌的影响..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.5 电聚合时间对聚吡咯形貌的影响..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.6 聚多巴胺沉积时间对形貌的影响..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.7 导电性..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.8 接触角测试..... 39
  - 2.2.9 电化学测试..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.10 稳定性..... 错误！未定义书签。
  - 2.2.11 防腐性能..... 错误！未定义书签。
- 2.3 本章小结..... 错误！未定义书签。
- 参考文献..... 错误！未定义书签。

## 第三章 聚吡咯/聚多巴胺纳米复合材料与成骨细胞的相互作用..... 错误！未定义书签。

- 引言..... 错误！未定义书签。
- 3.1 实验方法..... 49
  - 3.1.1 试剂和仪器..... 49
  - 3.1.2 成骨细胞的培养..... 错误！未定义书签。
  - 3.1.3 细胞实验装置及预处理..... 错误！未定义书签。
  - 3.1.4 聚多巴胺/聚多巴胺纳米复合材料对成骨细胞粘附、增殖和生物

合成的影响.....	错误！未定义书签。
3.1.5 统计学分析.....	59
<b>3.2 实验结果与讨论.....</b>	<b>59</b>
3.2.1 MTT 法检测细胞粘附增殖.....	59
3.2.2 荧光显微镜、SEM 观察细胞在材料表面的铺展情况.....	错误！未定义书签。
3.2.3 BCA 蛋白含量测定.....	错误！未定义书签。
3.2.4 碱性磷酸酶活性测定.....	错误！未定义书签。
<b>3.3 本章小结.....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
<b>第四章 全文结论与展望.....</b>	<b>错误！未定义书签。</b>
4.1 全文结论.....	错误！未定义书签。
4.2 展望.....	错误！未定义书签。
发表论文.....	错误！未定义书签。
致谢.....	错误！未定义书签。

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Conducting polymer nanocomposites material.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Synthesis methods of conducting polymer nanocomposites material ...	2
1.1.2 Descriptions and applications of conducting polymer PPy nanocomposites material.....	5
<b>1.2 Dopamine .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 The polymerization mechanism of dopamine .....	10
1.2.2 The polymerization methods of dopamine .....	112
1.2.3 The applications of dopamine .....	13
<b>1.3 Basic route and main contents .....</b>	<b>16</b>
<b>Reference .....</b>	<b>18</b>
<b>Chapter 2 The preparation and characterization of PPy/PDA nanocomposites material.....</b>	<b>23</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Experiments methods .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 Reagents and apparatus .....	25
2.1.2 The preparation of substrates .....	26
2.1.3 The preparation of reaction solution .....	26
2.1.4 The preparation of PPy/PDA nanocomposites material.....	27
2.1.5 Characterization of PPy/PDA nanocomposites material.....	28
<b>2.2 Results and discussion .....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Curve of chronopotentiometric .....	29
2.2.2 Characterization of morphology .....	30
2.2.3 Characterization of composition.....	32
2.2.4 The effects of different polymerization methods for the morphology of PPy.....	34
2.2.5 The effects of polymerization time for the morphology of PPy .....	35
2.2.6 The influence of polydopamine deposition time on morphology .....	35
2.2.7 Characterization of the conductivity.....	37

2.2.8 Characterization of the surface properties .....	39
2.2.9 Characterization of the electrochemical properties.....	41
2.2.10 Characterization of the stability .....	42
2.2.11 Characterization of the corrosion performance.....	43
<b>2.3 Conclusio of this chapter .....</b>	<b>45</b>
<b>Reference .....</b>	<b>47</b>
 <b>Chapter 3 The interaction between PPy/PDA nanocomposites</b>	
<b>material and MC3T3-E1 .....</b>	<b>48</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Experiments.....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Reagents and apparatus.....	49
3.1.2 The cultivation of MC3T3-E1 .....	54
3.1.3 Retreatment of the cell-culture device .....	55
3.1.4 The effects of PPy/PDA nanocomposites material on the adhesion, proliferation and biosynthese of MC3T3-E1 .....	56
3.1.5 Statistical analysis .....	59
<b>3.2 Results and discussion .....</b>	<b>59</b>
3.2.1 Chracterization of adhesion and proliferation by MTT .....	59
3.2.2 Chracterization of morphology by fluorescence and SEM.....	64
3.2.3 Detection of protein content by BCA .....	66
3.2.4 Detection of ALP activity .....	68
<b>3.3 Conclusion of this chapter .....</b>	<b>70</b>
<b>Reference .....</b>	<b>72</b>
 <b>Chapter 4 Summaries .....</b>	<b>73</b>
4.1 Conclusions.....	73
4.2 Expectations.....	73
 <b>Publications .....</b>	<b>75</b>
 <b>Acknowledgements .....</b>	<b>76</b>

## 第一章 绪论

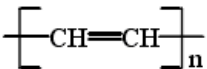
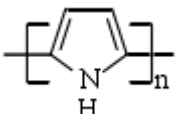
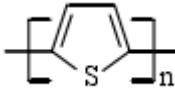
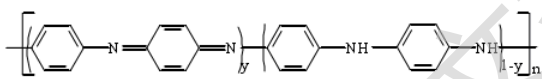

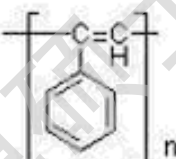
### 1.1 导电高分子纳米复合材料

导电高分子（导电聚合物）是指经化学或电化学掺杂后可由绝缘体向导体或半导体转变的含  $\pi$  电子共轭结构的有机高分子统称，是 20 世纪 70 年代发展起来的一个重要的研究领域，具有非常广阔的应用前景。导电高分子虽然具有不受原子的束缚的离域  $\pi$  电子，能在聚合链上自由移动，但是分子间的作用力限制了电子活动的范围，从而限制了导电高分子的导电性。因此没有经过掺杂处理的导电高分子导电率很低，几乎接近绝缘体。科学家发现经碘掺杂后的聚乙炔（PA）由原来的绝缘体变为导体，这一发现打破了高分子为绝缘体的传统观念，由此引发导电高分子研究热潮<sup>[1]</sup>。通过掺杂（n 型或 p 型）使导电高分子的共轭结构产生缺陷，电子或空穴在分子链上自由移动能够使高分子从绝缘体转变为导体。典型的导电高分子主要有：聚吡咯（Polypyrrole，简称 PPy）、聚乙烯二氧噻吩（Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)，简称 PEDOT）、聚苯乙炔（Polyphenylacetylene，简称 PPV）等芳烃及杂环聚合物及其衍生物，表 1-1 列出了几种常见导电高分子的结构式及最大电导率<sup>[2]</sup>。由于导电高分子材料具有分子结构可设计、良好的机械性能、密度小、导电率高等优秀的物理化学性能，其在传感器、太阳能电池、超级电容器、抗静电涂层、电致变色器、及信息贮存材料、生物医学材料等方面具有十分诱人的应用前景<sup>[3-14]</sup>。

随着现代科技的发展，人们对导电高分子材料的研究更加深入，通过纳米技术提升高分子材料性能已经成为材料研究的热点。纳米材料是指在三维中至少有一维处于纳米尺度范围或者由它们作为基元而组成的材料<sup>[14]</sup>，可分为纳米粒子、纳米团簇、纳米球、纳米纤维、纳米管、纳米棒、超薄膜等等。纳米材料由于纳米尺寸效应（小尺寸效应、量子尺寸效应、表面效应等），它们在很多方面的物理化学性质与常规材料相比有很大差异。因此，导电高分子纳米材料结合了导电高分子的导电性及纳米材料的高比表面积，具有极强的应用背景，有望在微电子、药物释放、催化、微机械、传感器等方面获得广泛应用<sup>[15-21]</sup>。

表 1-1 几种常见导电高分子的结构式及最大电导率

Table1-1 Structural formula and maximum conductivity of several important CPs

名称	结构式	最大电导率(S/cm)
聚乙炔 (PA)		1000-10000
聚吡咯 (PPy)		200-1000
聚噻吩 (PTH)		100-1000
聚苯胺 (PANI)		200
聚对苯 (PPP)		500
聚对苯撑乙烯 (PPV)		1000

### 1.1.1 导电高分子纳米复合材料的制备方法

纳米材料的制备方法有很多种，可通过物理和化学方法获得。物理方法主要有蒸发沉淀法和物理粉碎法等。化学方法主要通过适当的化学反应制备出具有特定形貌的纳米材料。总的来说，无论是物理还是化学法制备导电高分子纳米材料，其合成方法都可分为两大类：无模板法和有模板合成法。

#### (1) 模板法

##### A、硬模板法

硬模板法是将具有一定微纳米结构的材料，如介孔分子筛、多孔氧化铝、径迹刻蚀聚合物膜、胶体粒子等作为模板，通过化学或电化学聚合使目标聚合物的单体填充到模板里，然后再除去模板，最后得到纳米结构聚合物。

例如 Adia 等人<sup>[22]</sup>通过硬模板法合成了新型的、复合紧实的由六边形介孔二氧化硅隔开的聚吡咯纳米纤维复合材料。首先将吡咯单体与表面活性剂结合，利用溶胶-凝胶基模板聚合吡咯单体，介孔二氧化硅里面的吡咯单体在氧化剂作用下，发生聚合。反应过程中，聚吡咯区域被一维硅酸盐纳米通道被隔离，纳米约束效应在极化子复合为双极化子中发挥作用。

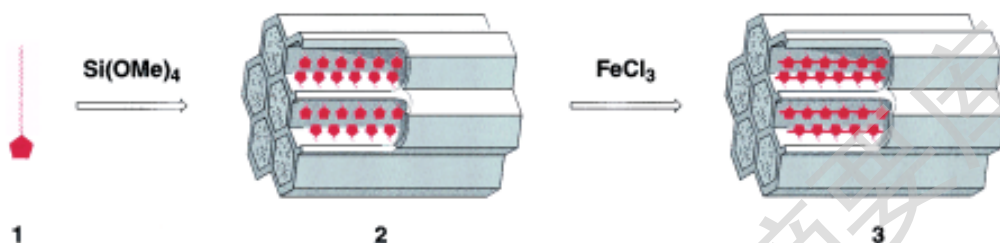


图 1-1 介孔硅与聚吡咯复合材料合成示意图

Fig. 1-1 Schematic representation of the template synthesis of a polypyrrole/silica nano-composites material

Johnson 等<sup>[23]</sup>采用多孔的整体式二元共聚物（聚苯乙烯和聚环己基乙烯）为模板，合成了聚吡咯的纳米线及 CdS 纳米颗粒，反应结束后模板可用四氢呋喃除去。图 1-2 为合成示意图，其中(a) 为二嵌段共聚物（聚苯乙烯和聚环己基乙烯），(b)为共聚物形成的圆柱形态模板，(c) 通过流动取向获得的宏观排列的圆柱形态，(d) 去除微量组分产生纳米多孔模板，(e)和(f) 分别在模板中制备纳米线和纳米颗粒，(g)和(h)为去除模板后获得纳米线和纳米粒。

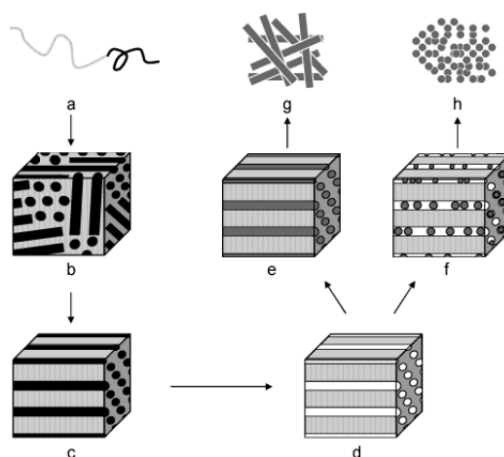


图 1-2 聚吡咯纳米线及 CdS 纳米颗粒合成示意图

Fig. 1-2 Schematic representation of the template synthesis of polypyrrole nanowires and CdS nanoparticles

## B、软模板法

软模板法与硬模板法类似,也需要一个后处理的步骤来除去表面活性剂。相对于硬模板法,软模板比较容易去除,但影响最终产物形貌和结构的因素更加复杂,除了单体和氧化剂浓度等自身因素外,温度、pH 值等外在因素均能影响到材料最终形貌结构。

Wan 等<sup>[24]</sup>采用水杨酸作为表面活性剂,通过调节苯胺单体和水杨酸的浓度比,合成出了聚苯胺的纳米管和空心球。其形成原理是一定比例下的水杨酸和苯胺能够形成特定形状的胶束,这种具有特定形状的胶束可以作为模板形成水杨酸掺杂的聚苯胺纳米结构。

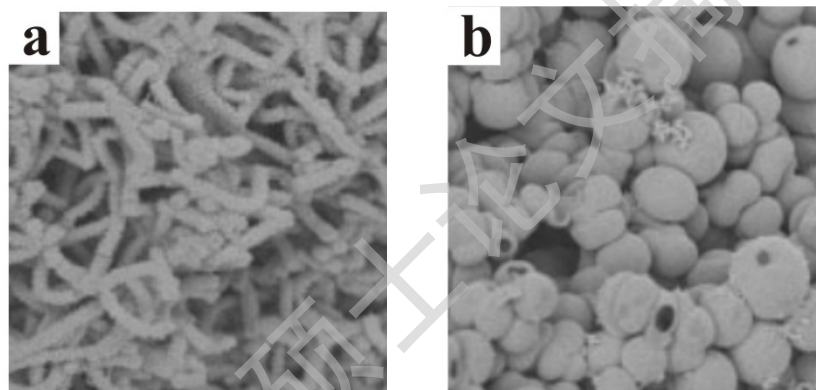


图 1-3 聚苯胺的纳米管和空心球扫描电镜图

Fig. 1-3 The SEM of polyaniline nanotubes and hollow microspheres

### (2) 无模板法

无模板法即直接合成法,在没有外界模板的帮助下,通过采用特定的实验条件,利用分子间的相互作用(氢键、范德华力、离子键、配位键等),使分子自组装成为纳米球、纳米线等具有特定形貌的结构,进而依赖此结构合成产生特定结构的纳米材料。该方法具有简单易行、无需表面活性剂和模板后处理、产量高等优点,但高分子形貌较难控制,反应体系较为复杂,技术上不如模板法成熟,且目标产物难以纯化。

Feng 等<sup>[25]</sup>在聚乙烯吡咯烷酮存在下,采用油水界面的方法合成了 PPy/Ag 核壳纳米结构复合材料,通过控制适当的实验条件可以制备出分散度很高的 Ag/PPy 的复合材料。在金的修饰下, Au/PPy/Ag 纳米复合材料可用于制备多巴胺生物传感器。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.